

Activitats pràctiques de LCIR – Mòdul 1

Circuits Analògics lineals

PRT1. Etapa amplificadora en EC

Introducció

El primer mòdul que tractarem a l'assignatura està relacionats amb aplicacions d'àudio. Per tal de determinar, i fins i tot dissenyar, especificacions com poder la potència d'àudio d'un equip, la qualitat del so o el rang de freqüències al que funciona òptimament, requereix tota una sèrie de mesures especials. Per tant, l'objectiu d'aquesta pràctica consisteix en aprendre a realitzar aquestes mesures. Concretament les especificacions són les següents:

- El guany de tensió
- El marge dinàmic de la tensió de sortida
- La potència de sortida i el rendiment energètic del sistema.
- La funció de transferència
- La distorsió harmònica que introdueix l'amplificador
- La característica freqüencial

Per fer-ho, començarem amb un sistema que ja coneixeu (*l'amplificador en emissor comú*, EC).

Nota:

Realitzeu els procediments que s'indiquen en cada apartat i preneu nota de les dades que us demanen. En algun cas, és possible que hàgiu de representar algun senyal de l'oscil·loscopi. Si és així podeu utilitzar el software d'adquisició d'imatges que instal·lat al PC per aquesta utilitat, o bé podeu fer una fotografia amb el mòbil. En qualsevol cas, és molt important que s'observin les dades de CONFIGURACIÓ DE L'OSCIL·LOSCOPI.

Al mateix temps, cada apartat inclou una secció que s'indica amb una capçalera que té per nom *Preguntes relacionades*. **No cal que contesteu** aquestes preguntes **al mateix moment de fer la pràctica**. Aquestes, s'hauran de contestar quan realitzeu l'informe posterior després d'haver finalitzat la pràctica.

Treball lectiu (de grup)

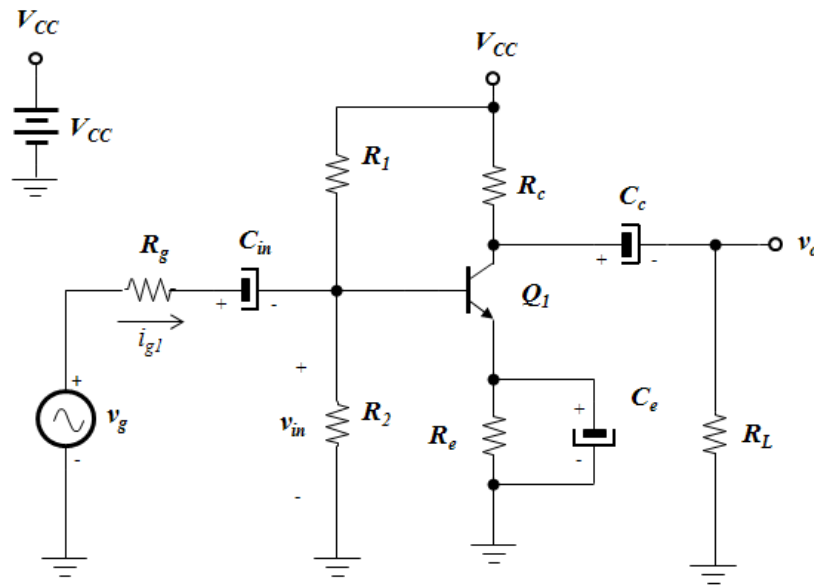


Figura. 1.- Etapa amplificadora amb BJT en emissor comú (EC). Components: $R_g = 50\Omega$ (correspon a la resistència interna del generador), $R_1 = 47k\Omega$, $R_2 = 6k8\Omega$, $R_c = 1k8\Omega$, $R_e = 470\Omega$, $R_L = 3k3\Omega$, $C_c = C_{in} = 10\mu F$, $C_e = 47\mu F$, $Q_1 = BC547B$

En primer lloc munteu el circuit que s'especifica a la figura 1 utilitzant els components que s'indiquen. Inicialment, utilitzareu una resistència R_L de $3k3\Omega$. La resistència r_g correspon a la resistència de sortida del generador, i que serveix per emular la senyal que proporcionar un micròfon o un sistema reproductor tipus mp3. A continuació, seguiu les instruccions que s'indiquen en cada apartat per agafar les dades necessàries.

L1 Polarització de l'etapa amplificadora.

En primer lloc, comproveu que el BJT estigui funcionant en la regió d'**activa**.

Per fer això, amb el generador de funcions desconnectat connecteu la font d'alimentació a **15V**. Mesureu les tensions de polarització dels següents punts: V_{R2} , V_E , V_C , anoteu les dades i determineu indirectament el corrent I_{CQ} . Si determineu que el BJT no està treballant en activa, haureu de repassar el circuit i corregir els errors de muntatge abans de procedir al següent apartat.

Canvieu el valor actual de R_L per un altre. Per exemple, $10k\Omega$ i observeu si es produeixen canvis a V_{CEQ}

- **Preguntes relacionades:**

- 1) Quina influència té la resistència R_L sobre el punt de treball? Per què?
- 2) Quin és l'error relatiu de I_{CQ} respecte als resultats de simulació

$$\text{Nota: Error}_{\text{relatiu}} : \varepsilon_{I_{CQ}} = \left| \frac{I_{CQ(\text{Simulació})} - I_{CQ(\text{real})}}{I_{CQ(\text{Simulació})}} \right| \times 100$$

L2 Guany del sistema: $K = v_o / v_{in}$

Connecteu el generador de funcions a l'entrada del circuit (v_{in}). Desconnecteu R_L . Apliqueu un senyal d'entrada del tipus $v_g = V_p \sin(2\pi ft)$ on V_p correspon a l'amplitud de l'ona sinusoidal i f és el valor en Hz de la freqüència. Agafeu $f = 5\text{KHz}$. El valor de V_p l'heu d'ajustar vosaltres segons convingui per tal de que l'amplitud de v_o no quedi retallada.

Representeu gràficament els senyals $v_{oI}(t)$, $v_{in}(t)$.

Nota: D'ara en endavant, utilitzareu **sempre** tots dos canals de l'oscil·loscopi i indicareu en tot moment la posició dels comandaments de l'oscil·loscopi (CH1, CH2 Base de Temps i Acoblament), tot ajustant la sensibilitat dels canals segons convingui per tal de no cometre errors d'apreciació considerable en la lectura dels paràmetres que es demanen. Per altra banda, si l'ordinador (PC) té el software d'adquisició de dades instal·lat, el podeu utilitzar per guardar la imatge de l'oscil·loscopi en un fitxer

Anoteu el guany ($A_{vI} = v_o / v_{in}$) en diferents instants de temps dintre del cicle d'entrada. Agafeu 4 valors (dos a cadascun dels semicicles).

Connecteu R_L i torneu a repetir l'anterior procediment. Utilitzeu la resistència de $3\text{k}\Omega$.

• Preguntes relacionades:

- 1) Quina influència té la resistència R_L sobre el guany? Per què?
- 2) Determineu l'error relatiu del guany respecte al guany teòric.
- 3) Es tracta d'un sistema lineal? Comenteu la resposta.

Nota: Un sistema es considera lineal quan:

$$K(V_{i1} + V_{i2}) = KV_{i1} + KV_{i2}$$

L3 Marge dinàmic: Δv_o .

Desconnecteu R_L un altre cop i determineu el marge dinàmic. Per això, cal augmentar l'amplitud de v_i fins que es vegi que la sortida JUST comenci a retallar. El valor d'amplitud resultant correspon al marge dinàmic. N'hi ha dos valors del que s'han de prendre nota: un al semicicle positiu i un altre al negatiu.

Representeu els senyals i anoteu el valor d'amplitud màxima del semicicle que abans comenci a patir la saturació.

Repetiu el procediment anterior amb la resistència R_L de $3\text{k}\Omega$.

• Preguntes relacionades:

- 1) Quina de les dues dades que s'agafen del valor màxim de sortida correspondria al marge dinàmic del sistema? Per què?
- 2) Quina influència té la resistència R_L sobre el marge dinàmic? Per què?

3) Indiqueu una modificació al circuit que permeti incrementar el marge dinàmic.

L4 Funció de transferència.

La característica de transferència ens permet conèixer de manera molt intuïtiva i gràfica la funció desenvolupada pel el circuit. En aquesta pràctica, la funció que desenvolupa un amplificador de tensió es correspon amb el següent diagrama de bloc:

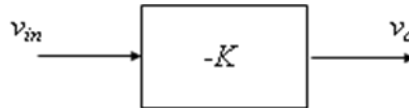


Figura 2.- Diagrama de bloc general d'un amplificador de tensió que implementa la funció $v_o = -Kv_{in}$

El mode XY és un mecanisme de l'oscil·loscopi que permet visualitzar aquesta representació en temps real. Sense la R_L realitzeu el següent procés i representeu en detall la relació v_o-v_{in}

1. Configureu l'oscil·loscopi per treballar amb el mode X-Y:
 - Botó **Main/Delayed**, opció: **Y-T** → **X-Y** (Oscil·loscopi digital del L-103) o bé **botó X-Y** (si utilitzeu l'oscil·loscopi analògic del L-102)
 - Acoblament: **AC**
 - Nivell de referència dels canals (Offset): **0V**
2. Incrementeu la magnitud del senyal d'entrada per tal d'observar el comportament del sistema amb el transistor treballant en les zones de tall i saturació
3. Ajusteu la sensibilitat de tots dos canals per tal d'observar qualitativament la funció de transferència.

• Preguntes relacionades:

1) Com es mesura el guany i el signe de la funció de transferència utilitzant aquesta gràfica?

L5 Distorsió harmònica (THD).

Tot i que la característica de transferència ja dona una idea gràfica de la no linealitat, i per tant la distorsió del sistema, no serveix per donar una mesura numèrica d'aquesta especificació. L'opció **FFT** de l'oscil·loscopi, que realitza el càlcul de la *transformada de Fourier* sobre el canal de l'oscil·loscopi corresponent, permet representar els harmònics del senyal de sortida sobre els quals es pot calcular el THD (*Total harmonic distortion*).

Realitzeu els següents passos per obtenir la mesura i representeu gràficament l'espectre freqüencial del senyal de sortida.

1. Seleccioneu l'opció FFT de l'oscil·loscopi que es troba dintre del menú que apareix quan es pulsa el botó MATH.
2. A l'opció 'magnitude' seleccioneu *dBrms* i l'opció *Hamming* a 'window'.
3. Ajusteu l'escala de freqüències a un valor que es correspongui amb l'harmònic principal del senyal d'entrada (5Khz/div). Aquesta configuració es realitza amb el botó Time/Div, doncs quan es determina la FFT, l'oscil·loscopi canvia de la variable de *temps* a *freqüència*.
4. Heu de vigilar que al ajustar la magnitud, el senyal no sobresurti de la pantalla de l'oscil·loscopi doncs per aquest càlcul, l'instrument només considera les mostres que s'observen dins de la pantalla.
5. Calculeu la distorsió harmònica amb la següent expressió:

$$THD(\%) = \frac{\sqrt{a_1^2 + \dots + a_N^2}}{a_0} \quad (1.1)$$

on a_n és l'amplitud corresponent a cadascun dels n harmònics (o deltes que s'observen a la gràfica), dels quals, a_0 n'és l'harmònic fonamental que correspon a la freqüència del senyal d'entrada ($f=1\text{Khz}$)

- **Preguntes relacionades:**

- 1) Com seria l'espectre si el sistema no introduís distorsió?

L6 Ample de banda BW (Band Width)

Per acabar, la pràctica mesurarem experimentalment (i de manera aproximada) la resposta freqüència de l'amplificador, que vindria ser l'equivalent a obtenir el diagrama de Bode (en mòdul i fase) de manera experimental al laboratori. Els següents processos permeten determinar, per una banda, el **rang de freqüències** del senyal d'entrada (f_{min} i f_{max}) dintre del qual el guany es manté constant i la fase.

- 1) Procés de mesura per al mòdul de guany $|H(j\omega)|$ i les freqüències de tall (f_{min} i f_{max})

Utilitzant les mateixes condicions en les que vau finalitzar l'apartat P3, i amb $R_L = 3\text{k}\Omega$ realitzeu el següent procés:

- Anoteu el valor de pic de la tensió de sortida en la banda de pas (5KHz) que anomenarem $v_{o(mitges)}$. El guany en la banda de pas correspon al guany de tensió mesurat en aquest punt i que ja va mesurar a P2.
- Augmenteu la freqüència del generador (v_g) fins que observi que l'amplitud de la sortida disminueix fins al valor especificat per la següent expressió ($v_{o(-3dB)}$):

$$v_{o(-3dB)} = \frac{v_{o(mitges)}}{\sqrt{2}} \quad (1)$$

Nota: Per tal de precisar en aquest valor es recomana que us ajudeu amb les opcions de *cursor* de l'oscil·loscopi i realitzar increments de freqüència molt fins quan estigueu al voltant d'aquest valor.

- El valor de freqüència obtingut correspon a f_{cmax} . Per obtenir f_{cmin} heu de repetir el procés, però en l'apartat b) heu de disminuir la freqüència del generador.

2) Procés de mesura per la fase $\phi(\omega)$

Per mesurar la fase del sistema a una determinada freqüència f cal mesurar les diferències de temps entre dos punts comuns dels senyals: entrada i sortida, respectivament. No obstant, vosaltres només ho fareu en dos punts f_{cmin}, f_{cmax} trobats anteriorment:

- Amb el senyal d'entrada a f_{cmax} i mostrant a la pantalla els senyals d'entrada i sortida, mesureu la diferència de temps t_d entre el valor de pic de sortida i el d'entrada.
- Apliqueu la següent expressió per calcular la fase:

$$\phi = \frac{t_d}{T} \cdot 2\pi \text{ (radians)}, \text{ o bé } \phi = \frac{t_d}{T} \cdot 360 \text{ (graus)} \quad (2)$$

Recordeu que $T = 1/f$.

- Repetiu el mateix procés amb f_{cmin}

Nota: Aquest mètode presenta l'inconvenient de que és impossible determinar quin dels dos senyals està més avançat o retardat, la qual cosa provoca que sigui difícil determinar el signe de la fase si no es coneix, a priori, el sistema que hi ha entre mans. Això és degut a que l'oscil·loscopi utilitza un sincronisme del *trigger* per representar de manera estàtica els senyals que elimina les referències de temps. Alternativament, existeix un altre mètode per mesurar la fase mitjançant el mode XY del oscil·loscopi. En aquest mètode l'angle es mesura segons la forma circular representada amb l'avantatge de que és possible determinar unívocament la fase (consulteu el manual de l'oscil·loscopi HAMEG per obtenir més informació al respecte)

- **Preguntes relacionades:**

1) Quina seria la zona freqüencial de funcionament normal de l'amplificador?

L7* Disseny de l'etapa

Nota important: Aquest apartat, tot i ser **obligatori** de cara a l'avaluació d'aquesta pràctica, **no es tindrà en consideració** de cara als terminis que tingui la realització d'aquesta activitat.

Canvieu els valors de les resistències del circuit pels valors que hàgiu determinat a l'activitat **EXI1**, i mesureu el punt de treball, el marge dinàmic i el marge dinàmic.

Determineu si esteu dintre de les especificacions que us van assignar. En cas de no estar dintre de les especificacions, feu les modificacions al circuit que creieu necessàries.

- **Preguntes relacionades:**

1) Comenteu els resultats obtinguts i compareu-los tant amb les dades teòriques de l'EXI1 com la simulació. Calculeu els errors que trobeu i indiqueu si heu necessitat modificar algun dels valors calculats prèviament.

Consideracions respecte a l'estructura, format i contingut de l'informe

Referent al informe que heu de presentar al cap d'una setmana almenys haureu de respectar algunes pautes bàsiques que es descriuen a continuació:

- **No cal incloure els enunciats dels apartats.**- Això comporta omplir massa fulls amb informació innecessària. És suficient amb indicar el número de l'apartat i un títol descriptiu breu amb el contingut, procediment o pregunta que s'estigui contestant.
- **Les dades de laboratori serveixen per complementar i recolzar els vostres comentaris.** Moltes de les contestacions a les preguntes que es plantegen es troben en les dades que heu obtingut en el laboratori. Degut a això, és necessari que recolzeu les vostres afirmacions fent referències a les mateixes. Per aquesta raó, els gràfics, les taules i la resta de dades no han de tenir un paper merament decoratiu en el vostre informe si no que han d'estar degudament numerats per facilitar la seva identificació quan realitzeu referències als vostres comentaris
- **Les dades han de tenir la qualitat i incorporar la informació addicional suficient com per no generar especulació al voltant dels resultats obtinguts.** Per aquesta raó és convenient indicar la configuració dels instruments i indicar els processos addicionals que heu realitzat en les mesures (sempre que no s'hagin indicat al guió de la pràctica i siguin el suficientment importants com per ser comentats). També us heu d'assegurar que expresseu clarament les magnituds i unitats de les variables elèctriques mesurades. Per últim destacar que no és correcte realitzar comentaris al voltant de dades que no hagin estat incloses.
- **Les afirmacions s'han de realitzar amb coneixement de causa.** Una pregunta contestada, reflexió o una conclusió que hàgiu realitzat ha d'estar acompanyada amb el corresponent raonament i/o justificació. En aquest sentit, l'informe perd seriositat si no realitzeu referències a les dades concretes obtingudes o bé, en absència de les mateixes, no aporteu demostracions o referències bibliogràfiques (apunts de classe, links o altres llibres de text) que donin suport als vostres arguments.

Activitats pràctiques de LCIR – Mòdul 1

Circuits Analògics lineals

PRT2. Etapes amplificadores realimentades

Introducció

A la primera activitat de laboratori hem vist que l'amplificador de tensió bàsic (EC) presenta molts inconvenients: és difícil de dissenyar, doncs tant el guany com el marge dinàmic depenen de tots els components i, a més, si els guanys són elevats el circuit deforma el senyal original de l'entrada. L'amplificador que veurem a continuació soluciona aquests problemes, per la qual cosa, està bastant estesa en molts equips preamplificadors d'àudio comercials. El circuit de la figura 1 correspon a un preamplificador que utilitza *realimentació* per fixar un guany precís de 30dB per qualsevol senyal d'entrada. Un marge dinàmic de 6.5V (amb una càrrega de sortida $R_L = 250\Omega$) i una impedància d'entrada de $500k\Omega$ aproximadament. En aquest cas, la realimentació utilitza una comparació 'sèrie' de tensió a l'entrada i un mostreig *shunt* de tensió a la sortida. A més, el sistema està format per dues etapes amb BJT que es connecten en sèrie per incrementar de manera considerable el guany del bloc A (i que la formen Q_1 i Q_2 , respectivament). La realimentació és utilitzada de manera general en preamplificadors d'àudio amb semiconductors discrets de silici¹ quan no es desitja que el sistema no introdueixi distorsió. Aquest tipus d'equips engloben els mescladors multicanal i els filtres de so, entre d'altres. A més, aquesta particularitat fa que els sistemes realimentats s'utilitzin també com a llaços de control d'altres tipus de sistemes electrònics, mecànics, hidràulics, etc.²

Treball lectiu

En primer lloc, heu de muntar el circuit de la figura 1 amb els components que s'indiquen. Inicialment, no cal incloure cap resistència de sortida R_L ja que la resistència interna de l'oscil·loscopi serveix per aquesta funció.

¹ A diferència de les vàlvules de buit (vacuum tubes) amb les que es poden arribar a implementar etapes amplificadores en llaç obert.

² La realimentació també té la seva utilitat en el control de sistemes en general ja que, des d'un altre punt de vista, el fet de realimentar la variable de sortida (i_o en aquest cas) mitjançant β per comparar-la amb l'entrada ($i_i - \beta \cdot i_o$) es pot interpretar com un sistema que intenta corregir l'error de senyal en un punt del circuit (per exemple $v_{be} \rightarrow 0$) i que actua com a control sobre la *planta* (sistema d'amplificació no lineal, com el EC, però que presenta un guany elevat) de manera que la sortida segueix la consigna d'entrada. Per tant, en circuits amplificadors, la realimentació serveix per eliminar les no linealitats dels semiconductors ($i_o = i_i/\beta$) més que per controlar.

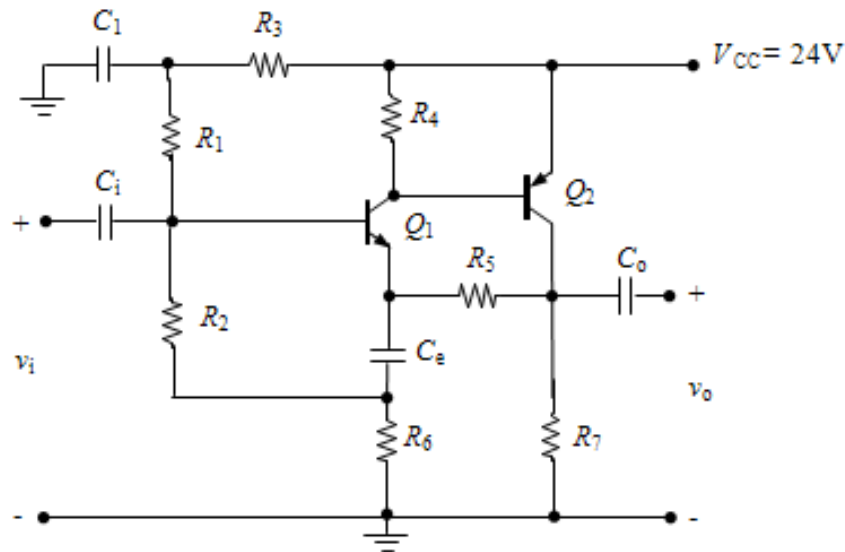


Figura. 1.- Amplificador multietapa amb realimentació. Llista de components: $Q_1 = \text{BC547B}$, $Q_2 = \text{BC557B}$, $C_1 = C_o = 4.7\mu\text{F} / 25\text{V}$, $C_i = 1\mu\text{F} / 25\text{V}$, $C_e = 10\mu\text{F} / 25\text{V}$, $R_1 = 680\text{k}$, $R_2 = 1.5\text{M}$, $R_3 = 100\text{k}$, $R_4 = 33\text{k}$, $R_5 = 33\text{k}$, $R_6 = 1\text{k}$, $R_7 = 5\text{k}$.

Treball lectiu (de grup)

- L1) Comprovació del funcionament en repòs.** Mesureu les variables de repòs (DC) que s'indiquen a continuació:

V_{B1} .- Tensió a la base de Q_1 .

V_{C1} .- Tensió al col·lector de Q_1 (o bé la base de Q_2).

V_{E1} .- Tensió al emissor de Q_1 .

V_{C2} .- Tensió al col·lector de Q_2 .

Nota: Heu de calcular indirectament els valors de I_{CQ1} i I_{CQ2} abans de continuar amb el següent apartat per tal de comprovar que tots dos transistors estan treballant en la regió d'activa. Procediu de la mateixa manera que al punt L1 de la pràctica anterior

• Preguntes relacionades:

- (1) Determineu aproximadament el valor teòric de les tensions anteriors, així com el valor de I_{CQ1} i I_{CQ2} . Compareu amb les dades de laboratori i comenteu els resultats.

- L2) Comportament dinàmic.** Amb el generador de funcions, introduïu un senyal sinusoidal amb una freqüència de 5KHz. Mesureu el guany de tensió, $|K|$, el marge dinàmic (Δv_o). Repetiu aquest apartat per cadascuna de les situacions de la taula 1.

R_5	R_L	$ K $	Δv_o
10k Ω	∞		
33k Ω			
47k Ω			
10k Ω	1k Ω		

33k Ω			
47k Ω			

Nota: L'entrada ha de ser suficientment gran com per que la sortida es vegi retallada en els dos semicicles. Utilitzeu el mode XY per fer aquest apartat i representeu gràficament la seva característica.

- **Preguntes relacionadas:**

- (1) Calculeu el valor teòric de $|K|$ i de Δv_o en cadascun dels casos de la taula anterior. Comenteu els resultats.
- (2) Segons els coneixements teòrics, com hauria d'afectar el canvi de R_5 al guany $|K|$? I al marge dinàmic Δv_o ? Ha estat així a la pràctica?
- (3) Segons els coneixements teòrics, com hauria d'afectar el canvi de R_L al guany $|K|$? I al marge dinàmic Δv_o ? Ha estat així a la pràctica?

L3) Mesura de la característica freqüencial. Amb $R_L = \infty$, determineu experimentalment la resposta freqüencial aproximada tal i com es va explicar a la pràctica anterior. Ompliu la taula 2.

R_5	f_L	f_H	BW
10k Ω			
33k Ω			
47k Ω			

Nota: No cal que mesurar la fase de la característica freqüencial.

- **Preguntes relacionadas:**

- (1) Quina relació hauria de seguir l'ample de banda (BW) i el guany del sistema en llaç tancat $|K|$ pels diferents valor de R_5 ? Ha estat així?

L4) Distorsió harmònica (THD). Amb $R_5 = 33k\Omega$ mesureu la distorsió harmònica mitjançant l'opció FFT de l'oscil·loscopi.

- **Preguntes relacionadas:**

- (1) Segons aquest resultat, quina millora aporta el sistema respecta al amplificador de la pràctica 1?
- (2) Com es pot justificar aquesta millora amb les dades de l'apartat L2?

L5) Dessensibilització del sistema en llaç tancat. Canvieu R_4 per un valor més petit (i.e. 5k Ω) i mesureu de nou el guany del sistema $|K|$.

- **Preguntes relacionadas:**

- (1) Per quin motiu, R_4 altera el guany del sistema?

Activitats pràctiques de LCIR – Mòdul 1

Circuits Analògics lineals

PRT3.- Etapes de potència

En la pràctica anterior hem vist que la no linealitat en els preamplificadors es corregeix mitjançant la realimentació. No obstant, en equips HI-FI la potència d'aquests amplificadors és insuficient com per poder escoltar, per un altaveu, el so de l'àudio a un volum raonable. Cal una etapa de potència enmig del preamplificador i l'altaveu.

L'objectiu de les etapes de potència consisteix en incrementar el corrent d'àudio a la sortida. És a dir, el guany de corrent (A_i) d'aquest sistema ha de ser elevat. En canvi, el guany de tensió és unitari. Per això la sortida sol ser en *col·lector comú* (terra al col·lector i sortida a l'emissor) si es tracta d'una etapa amb BJT's de potència, o bé *drenador comú* en el cas d'utilitzar transistors MOSFET. La configuració més econòmica és la *classe AB* que, com heu vist, presenta un millor comportament respecte a la distorsió harmònica i el rendiment, gràcies a que hi ha dos transistors complementaris (*push-pull*) que realitzen suament les transicions en els semicicles d'entrada per evitar el *crossover*.

En aquesta activitat aprendreu a determinar les dades que caracteritzen les especificacions de potència, com és el cas de la sortida ($P_{L(rms)}$), l'eficiència energètica (rendiment) i estudiareu amb més detall el comportament del *crossover*. Aquests sistemes són habituals a les botigues d'electrònica i es comercialitza amb tots els blocs en un circuit integrat per tal de facilitar la implementació. En aquesta pràctica, també veurem un d'aquests dispositius..

Treball no lectiu (de grup)

El primer circuit que muntareu en aquesta pràctica es troba representat a la figura 1. Correspon a un amplificador de potència senzill de 0.5W i que està dissenyat per a una alimentació asimètrica i per reproduir senyals en altaveus de 100Ω . El circuit inclou una etapa pre-amplificadora, una etapa de sortida en classe AB i els components són els que s'indiquen a la figura.

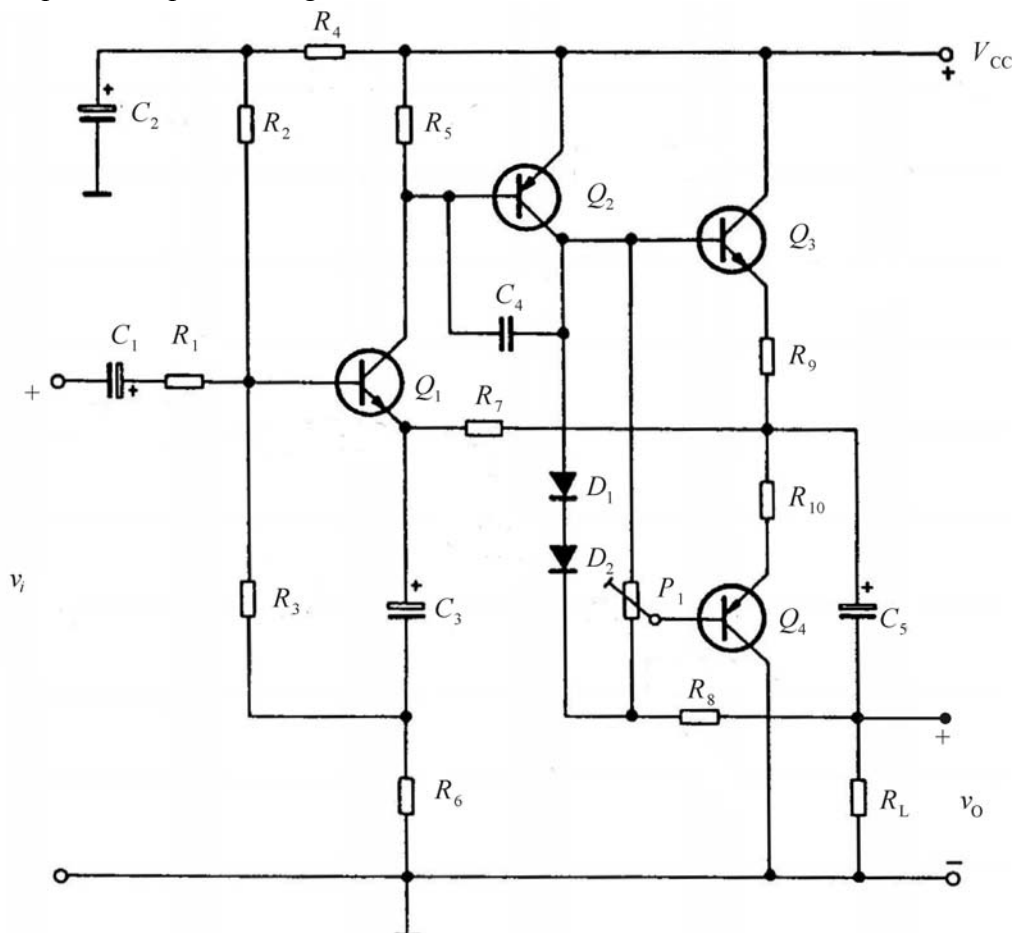


Figura 1.- Amplificador d'àudio de 0.5W configurat en classe AB. Components: $R_1=10k\Omega$, $R_2=390k\Omega$, $R_3=820k\Omega$, $R_4=R_5=56k\Omega$, $R_6=220\Omega$, $R_7=4k7\Omega$, $R_8=12k\Omega$, $R_9=R_{10}=4.7\Omega$, $R_L=100\Omega$. $P_1=4k7\Omega$, $C_1=470nF$, $C_2=10\mu F$, $C_3=C_5=47\mu F$, $C_4=10pF$. $D_1=D_2=1N4007$. $Q_1=BC547B$ ó C , $Q_2=BC557B$ ó C , $Q_3=BD243$, $Q_4=BD244$.

Comprovació del funcionament

L1) Munteu el circuit. En aquest cas, heu d'anar amb molta cura per tal de no confondre les connexions ni els terminals doncs el nombre de components que intervenen és considerable. Anoteu les següents dades del funcionament en repòs.

- V_{B1} .- Tensió a la base de Q_1 .
- V_{E1} .- Tensió a l'emissor de Q_1 .
- V_{B2} .- Tensió a la base de Q_2 .
- V_{C2} .- Tensió al col·lector de Q_2 .

- V_{K2} .- Tensió al càtode de D_2 .
- V_5 .- Tensió al terminal positiu de C_5 .
- V_{O+} .- Tensió DC a la càrrega R_L .
- I_{CQ1} i I_{CQ2} Corrent de polarització dels transistors de petit senyal (calculat indirectament).
- V_{RL} -Tensió DC a la càrrega R_L .

Nota: Heu de comprovar que el funcionament sigui correcte. Per aquesta raó heu de tenir al davant les dades sobre els punt de treballs de tots els transistors indicat als apunts i comprovar que els resultats de laboratori són similars. Alimenteu el circuit amb un valor de $V_{CC} = 20V$ i mesureu les següents variables de repòs.

Guany de tensió.

- L2)** Introduïu un senyal d'entrada inicial de **10mV de pic** i una freqüència de **500Hz**. Utilitzant el mode XY de l'oscil·loscopi, determineu el guany de tensió per les següents resistències de realimentació (R_7) i el marge dinàmic.

R_7	/K/	Δv_o
3k3 Ω		
4k7 Ω		
10k Ω		

• Preguntes relacionadas:

- 1) Comenteu el funcionament de la realimentació d'aquest circuit. Quin hauria de ser el guany de tensió global del sistema?
- 2) Quin és el marge dinàmic teòric del sistema?
- 3) Em ambdós, casos, coincideixen les dades teòriques amb els de laboratori? Justifiqueu les vostres respostes

Cross-over

- L3)** Utilitzant el valor de $R_7=4k7\Omega$, i treballant amb el marge dinàmic màxim possible (sense distorsió) ajusteu la sensibilitat de l'oscil·loscopi per tal de que s'apreciï el pas per zero de la sortida. Representeu el detall del pas per zero de $v_o(t)$ amb el cursor de P_1 situat a 0 Ω i 4k7 Ω , respectivament.

Mesura dels paràmetres de potència de l'amplificador

- L4)** En les mateixes condicions de l'apartat anterior, determineu les següents dades

- Valors de tensió de sortida: $V_{o(max)}$ i $V_{o(rms)}$
- Valor de corrent de sortida: $I_{o(max)}$ i $I_{o(rms)}$
- Consum promig de la font d'alimentació $I_{CC}=I_{o(max)}/\pi$.

• Preguntes relacionadas:

1) Determineu potència de sortida (P_L), potència mitja subministrada per la font d'alimentació (P_{CC}), les pèrdues de l'etapa de potència (P_{DQ1} i P_{DQ2}) i el rendiment (η).

Reproducció d'àudio amb un sistema comercial

El TDA7294 (Fig. 2) és un amplificador de potència de classe AB per aplicacions Hi-Fi comercials (Aparells domèstics d'àudio, altaveus auto-amplificats i TV's de gama alta). Gràcies a que admet diferents tensions d'alimentació i la corrent elevada que pot suportar, és possible obtenir potències de sortida considerables (fins a 100W per càrregues de 4 o 8 Ω). A més incorpora altres funcions, entre les que destaquen:

- Un *pre-amplificador*, amb el que es pot configurar el guany de tensió.
- Mecanisme de protecció de curt circuits (SCP.- *Short-Circuit Protection*) per protegir el dispositiu davant consums elevats o connexions accidentals de la sortida.
- Mecanisme de desactivació a l'escalfament del dispositiu (*Thermal Shut-Down*).
- Control de *Standby* and *Mute* mitjançant lògica TTL

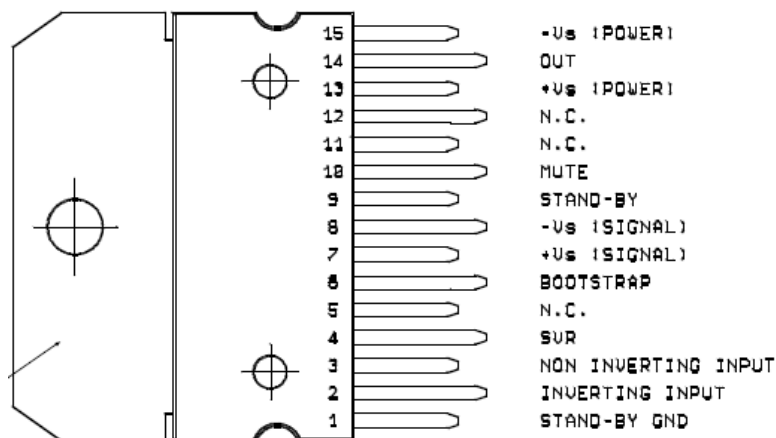


Figura 2.- Amplificador de classe AB, TDA 7294. Distribució de pins

L5) Munteu el circuit de la figura 3 amb els components que s'indiquen. Heu de respectar el número de pin (indicat en vermell) i que segueix la distribució de la figura 2. En aquest cas, l'alimentació del sistema és simètrica (Fig. 4) i necessiteu una font d'alimentació doble que podreu agafar del mateix aparell i que fixareu totes dues a **15V**.

Els terminals de MUTE i STDBY han d'estar a nivell alt per a que es pugui escoltar l'àudio per l'altaveu. Per aquesta funció, podeu utilitzar la tercera font auxiliar de la font (que és fixa i de 5V). Si teniu un reproductor mp3 tipus USB, podeu connectar la seva sortida a l'entrada del TDA 7294 utilitzant un dels canals 'stereo'. L'altaveu i el cable de connexió l'heu de demanar al professor.

Activeu el reproductor per veure si s'escolta el seu senyal d'àudio per l'altaveu. Utilitzeu l'oscil·loscopi per observar la complexitat de la forma d'ona elèctrica que presenta un senyal d'àudio. Si utilitzeu l'opció FFT es poden observar com varia que els harmònics varien tant en amplitud com freqüència, de la mateixa manera que es pot observar en qualsevol programa informàtic de reproducció d'àudio (P.e. Windows Media Player)

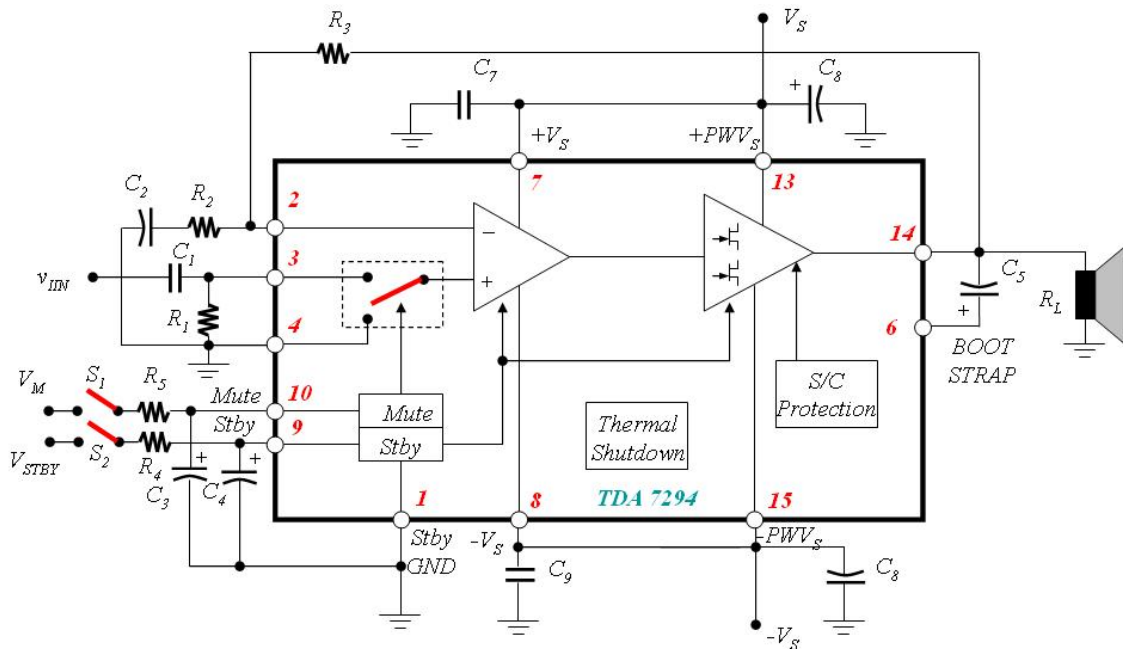


Figura 3.- Muntatge de prova per a la verificació del funcionament del TDA7294. Components: $R_1=R_3=R_4=22k\Omega$, $R_2=680\Omega$, $R_5=10k\Omega$, $R_L=8.2\Omega$ (Altaveu), $C_1=470nF$, $C_2=C_5=22\mu F$, $C_3=C_4=10\mu F$, $C_6=C_7=1000\mu F$, $C_8=C_9=100nF$

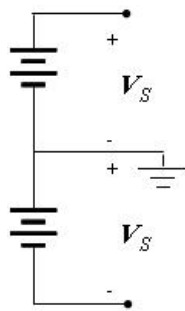


Figura 4.- Alimentació simètrica

- L6)** Connecteu el generador de funcions a l'entrada i una càrrega $R_L = 8.2\Omega$, enlloc del reproductor i l'altaveu, respectivament. Realitzant les mesures pertinents, determineu les dades que es demanen en les condicions de funcionament indicades.

Cas	Condicions	K	$V_{o(max)}$	$V_{o(ef)}$	$I_{o(max)}$	$I_{o(ef)}$	I_{CC} (I_{EE})
1	$v_{i(max)} = 0.1V$, $R_3 = 22k\Omega$, $V_{CC} = 15V$, $R_L = 8.2\Omega$, $S1=ON$, $S2=ON$						

2	$v_{i(max)} = 0.3V$, $R_3 = 22k\Omega$, $V_{CC} = 15V$, $R_L = 8.2\Omega$, S1=ON, S2 =ON						
3	$v_{i(max)} = 0.3V$, $R_3 = 22k\Omega$, $V_{CC} = 15V$, $R_L = 1k\Omega$, S1=ON, S2 =ON						
4	$v_{i(max)} = 1V$, $R_3 = 22k\Omega$, $V_{CC} = 15V$, $R_L = 8.2\Omega$, S1 =ON, S2 =ON						
5	$v_{i(max)} = 0.5V$, $R_3 = 22k\Omega$, $V_{CC} = 10V$, $R_L = 8.2\Omega$, S1 =ON, S2 =ON						
6	$v_{i(max)} = 0.1V$, $R_3 = 47k\Omega$, $V_{CC} = 15V$, $R_L = 8.2\Omega$, S1=ON, S2 =ON						
7	$v_{i(max)} = 0.3V$, $R_3 = 22k\Omega$, $V_{CC} = 15V$, $R_L = 8.2\Omega$, S1=OFF, S2 =ON						
8	$v_{i(max)} = 0.3V$, $R_3 = 22k\Omega$, $V_{CC} = 15V$, $R_L = 8.2\Omega$, S1=OFF, S2 =ON						

• **Preguntes relacionades:**

- 1) Per a que serveixen les funcions STNDBY i MUTE? Quina és la diferència entre elles?
- 2) Determineu potència de sortida (P_L), potència mitja subministrada per la font d'alimentació (P_{CC}), i el rendiment (η) als casos: 1, 2, 3, 6 i 7.
- 3) Com es pot justificar el marge dinàmic en els apartats 4 i 5?
- 4) Quin efecte té R_L sobre el guany (K) del circuit? Quina justificació podrieu donar?

Nota: Consulteu els apunts de la realimentació.

- 5) Quin canvi hauríeu de realitzar al circuit per tal de disposar d'un sistema per ajustar el volum d'àudio?

Activitats pràctiques de LCIR – Mòdul 1

Circuits Analògics lineals

PRT4.- Reguladors de tensió

Dintre de les fonts d'alimentació, l'objectiu dels reguladors de tensió consisteix en proporcionar una sortida (V_o) estable independentment de les fluctuacions de tensió de l'entrada V_{in} .

L'esquema elèctric de la figura 1 correspon a una font de tensió lineal de sortida unipolar, ajustable i amb protecció de corrents elevades. Per tal d'estudiar el funcionament d'aquest sistema, en aquesta pràctica només muntareu la part corresponent al regulador (traça discontinua).

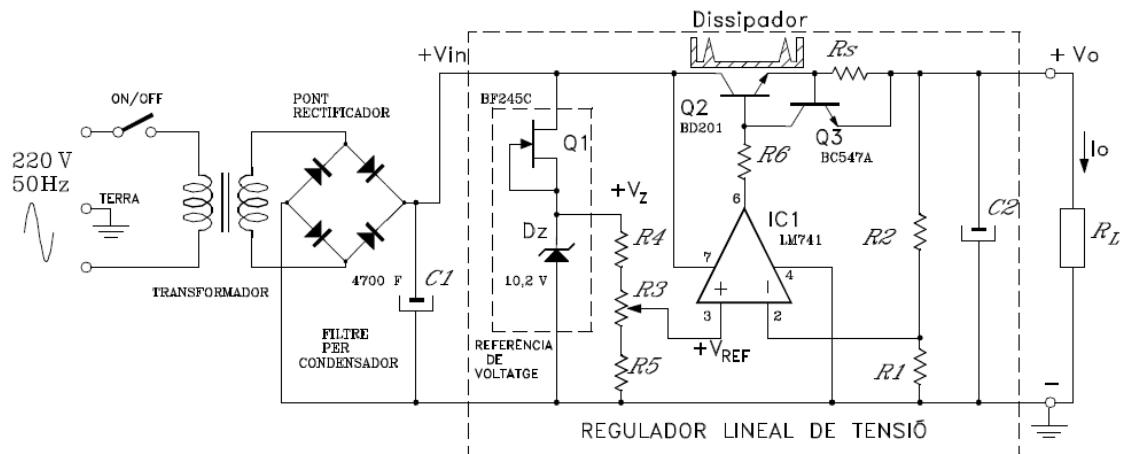


Figura 1. Esquema elèctric complet de la font d'alimentació.

Els components que utilitzareu seran els següents (només el regulador):

- **Resistències:** $R_1 = R_2 = R_3 = 10\text{k}\Omega$, $R_4 = 1.8\text{k}\Omega$, $R_5 = 3.9\text{k}\Omega$, $R_6 = 1\text{k}\Omega$, $R_s = 1\Omega$ (250mW), $R_L = 1\text{k}\Omega$ (Inicialment)
- **Condensadors:** $C_2 = 47\mu\text{F}$.
- **Semiconductors:** $D_z = \text{BZX10V2}$, $Q_1 = \text{BF245C}$ (ó B), $Q_2 = \text{BD243}$, $Q_3 = \text{BC547}$ (A, B ó C), $IC_1 = \text{LM741}$.

Treball lectiu

Comprovació del funcionament

- L1)** En primer lloc, munteu el circuit amb els components que s'indiquen per defecte (Fig. 1). Inicialment, configureu un valor de $V_{in} = 22V$. Mesureu les variables elèctriques que s'indiquen a continuació.

V_Z .- Tensió del díode zener.

V_{REF} .- Tensió al terminal no inversor del operacional.

V_{B2} .- Tensió a la base de Q_2 .

V_{E2} .- Tensió al emissor de Q_2 .

V_O .- Sortida.

- **Preguntes relacionadas:**

- 1) Justifiqueu raonadament els valors obtinguts, d'acord amb el funcionament teòric del circuit.
- 2) En quin estat es troba el transistor Q_3 ?

Rang de sortida

- L2)** Ompliu els valors de la taula per a les condicions de funcionament que s'indiquen i anoteu el rang de tensions que pot proporcionar el circuit a la sortida

V_{REF}	$V_{REF(min)}$	5V	7V	$V_{REF(max)}$
V_O				

- **Preguntes relacionadas:**

- 1) Si V_Z correspon a la consigna que permet establir la sortida del sistema, quina funció de transferència implementa el circuit?
- 2) Com caldria modificar el circuit per tal d'arribar a una tensió de sortida mínima regulada propera a 0V?

Determinació de la característica *Input Regulation* (IR) i *Output Regulation* (OR)

- L3)** Configureu el potenciòmetre R_3 per tal de treballar amb $V_{O(max)}$ segons l'apartat anterior. D'acord amb les configuracions de V_{in} i R_L indicada a la següent taula, ompliu les caselles corresponents amb el valor *exacte* de la sortida.

		R_L			
		8k Ω	1k Ω	220 Ω	30 Ω
V_{in}	20V				
	22V				
	26V				
	30V				

Nota: IR i OR es calculen d'acord amb les següents expressions:

$$IR = \left| \frac{V_{o(max)} - V_{o(min)}}{V_{in(max)} - V_{in(min)}} \right| \quad \text{i} \quad OR = \left| \frac{V_{o(max)} - V_{o(min)}}{I_{L(max)} - I_{L(min)}} \right|$$

Donat que les unitats són [mV/V] i [mV/A], és important que la lectura de V_o sigui bastant precisa. Per aquesta raó, heu d'utilitzar varis dígitos decimals al multímetre (3 o 4 com a mínim).

- **Preguntes relacionadas:**

- 1) Quin és el cas més desfavorable de V_{in} i R_L per aquests dos paràmetres?
- 2) Quina és la diferència d'aquests dos paràmetres respecte al valor teòric?

Les dues preguntes que venen a continuació tenen a veure amb les característiques energètiques del sistema, però es poden contestar amb les dades de la taula anterior

- 3) Determineu el rendiment (η) i apunteu el valor en una taula similar a l'anterior. Quin és el cas on el BJT de potència (Q_2) pateix més?
- 4) Si R_L fos fixa i V_o ajustable, existeix algun altre cas més desfavorable que l'anterior? Raoneu la resposta.

Protecció de sobrecorrent

- L4)** Amb R_3 configurat com si anéssim a treballar amb $V_{o(max)}$, canvieu la resistència R_L per un altre de valor $10\Omega/5W$. Anoteu els valor de V_o i I_o que hàgiu obtingut.

- **Preguntes relacionadas:**

- 1) Comenteu raonadament el que ha succeït al canviar el valor de R_L
- 2) Que caldria fer per augmentar el corrent de sortida a 1.5A. Quines precaucions caldria tenir en compte?

Característica de Drop-out

- L5)** Amb $V_{o(max)}$ a la sortida i amb una tensió inicial d'entrada $V_{in} = 24V$, reduïu V_{in} el màxim que pugueu fins que observeu que el sistema deixa de realitzar la seva funció de regulació. La frontera entre el funcionament correcte i incorrecte, determina el valor $V_{in(min)}$.

En aquest punt, mesureu el valor de V_{CE2} .

- **Preguntes relacionadas:**

- 1) Quin dels següents mecanismes que incorpora el sistema, és el que estableix el valor d'aquest paràmetre: la referència de voltatge (Q_1 i D_z), la limitació de sortida de l'operacional o la saturació del transistor de potència Q_2 ?

Reguladors Integrats Comercials

En general, el regulador de tensió és un sistema que s'integra en silici de manera que la seva connexió és molt més senzilla i fiable. Un exemple d'aquest sistema el trobem en el dispositiu **L7805** (Fig.) de la companyia Fairchild Semiconductor.

Entre les seves característiques principals de la Figura 3 destaquen una tensió de sortida nominal unipolar de **5V** fins a un corrent màxim de **2.2A**, protecció de sobrecorrent de tipus *Foldback* amb un corrent de curtcircuit $I_{SC} = 280\text{mA}$ i un Dropout de **2V**, entre d'altres.



Figura 2.- Distribució de pins del 7805: 1) V_{in} , 2) GND, i 3) V_o . El circuit ofereix una sortida estable de 5V entre el pins3 i 2.

Electrical Characteristics (KA7806/KA7806R)

(Refer to test circuit , $0^{\circ}\text{C} < T_J < 125^{\circ}\text{C}$, $I_O = 500\text{mA}$, $V_I = 11\text{V}$, $C_I = 0.33\mu\text{F}$, $C_O = 0.1\mu\text{F}$, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	KA7806			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Output Voltage	V_O	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	5.75	6.0	6.25	V
		$5.0\text{mA} \leq I_O \leq 1.0\text{A}$, $P_O \leq 15\text{W}$ $V_I = 8.0\text{V to } 21\text{V}$	5.7	6.0	6.3	
Line Regulation (Note1)	Regline	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	$V_I = 8\text{V to } 25\text{V}$ 5	$V_I = 8\text{V to } 25\text{V}$ 120	mV
				$V_I = 9\text{V to } 13\text{V}$ 1.5	$V_I = 9\text{V to } 13\text{V}$ 60	
Load Regulation (Note1)	Regload	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	$I_O = 5\text{mA to } 1.5\text{A}$ 9	$I_O = 5\text{mA to } 1.5\text{A}$ 120	mV
				$I_O = 250\text{mA to } 750\text{mA}$ 3	$I_O = 250\text{mA to } 750\text{mA}$ 60	
Quiescent Current	I_Q	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	5.0	8.0	mA
Quiescent Current Change	ΔI_Q	$I_O = 5\text{mA to } 1\text{A}$	-	-	0.5	mA
		$V_I = 8\text{V to } 25\text{V}$	-	-	1.3	
Output Voltage Drift	$\Delta V_O / \Delta T$	$I_O = 5\text{mA}$	-	-0.8	-	mV/ $^{\circ}\text{C}$
Output Noise Voltage	V_N	$f = 10\text{Hz to } 100\text{KHz}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	45	-	$\mu\text{V}/V_O$
Ripple Rejection	RR	$f = 120\text{Hz}$ $V_I = 9\text{V to } 19\text{V}$	59	75	-	dB
Dropout Voltage	V_{Drop}	$I_O = 1\text{A}$, $T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2	-	V
Output Resistance	r_O	$f = 1\text{KHz}$	-	19	-	$\text{m}\Omega$
Short Circuit Current	I_{SC}	$V_I = 35\text{V}$, $T_A = +25^{\circ}\text{C}$	-	250	-	mA
Peak Current	I_{PK}	$T_J = +25^{\circ}\text{C}$	-	2.2	-	A

Note:

1. Load and line regulation are specified at constant junction temperature. Changes in V_O due to heating effects must be taken into account separately. Pulse testing with low duty is used.

Figura 3.- Característiques elèctriques segons Fairchild Semiconductors.

Característiques del Regulador Integrat

L6) Comproveu si els paràmetres següents de taula, ofereixen els valors que indica el fabricant

- Valor nominal de V_o .
- $IR = \Delta V_o / \Delta V_{in}$
- $OR = \Delta V_o / \Delta I_o$
- I_{FLB} (Corrent Foldback. És el corrent màxim I_o que el circuit integrat pot donar quan $V_o = 5V$)
- I_{SC} (Corrent I_o quan hi ha un curtcircuit entre V_o i GND)

- **Preguntes relacionades amb el 7805**

- 1) Dissenyeu un circuit que, utilitzant el 7805, sigui capaç d'oferir una sortida variable entre 0 i 10V.

Activitats pràctiques de LCIR – Mòdul 1

Circuits Analògics lineals

PRT5.- Astable amb 555, temporitzador, i generador d'ona sinusoidal

Treball lectiu

CIRCUIT 1: Generador d'ona quadrada

- L1) En el primer muntatge, heu de aconseguir que el circuit de la figura 1 funcioni amb les especificacions que s'indiquen a la **taula 1**.

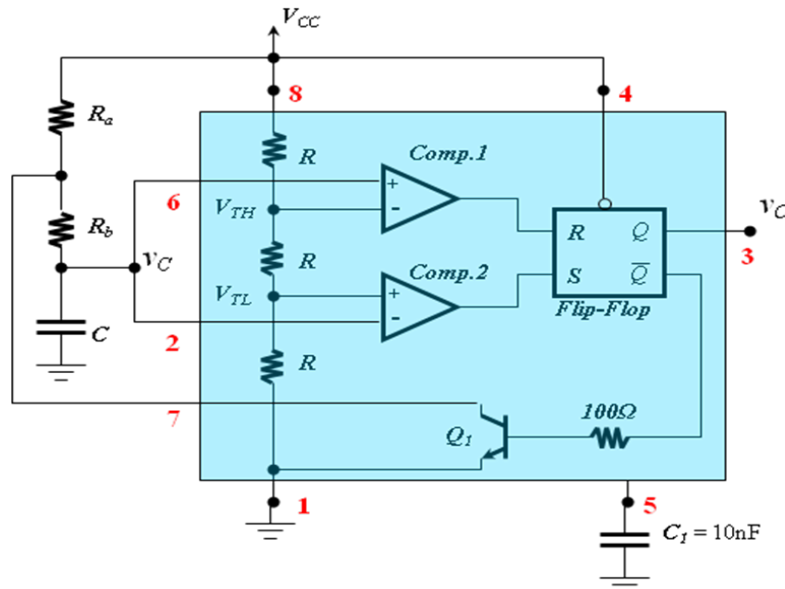


Figura 1.- Esquema elèctric del generador d'ona quadrada amb 555

Estudiant	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
DT (%)	60	70	65	90	70	75	55	60	55	65
f_o (KHz)	10	5	25	50	28	30	20	60	50	70

Taula 1.- Especificacions per a cada estudiant del primer circuit

- 1) Consulteu els apunts i, mitjançant càlculs determineu els valors de R_a , R_b i C que necessiteu per obtenir les especificacions de la taula 1
- 2) Munteu el circuit i representeu els senyals $v_C(t)$ i $v_O(t)$.

• Preguntes relacionades:

- 1) Comenteu els punts més rellevants de les formes d'ona que heu obtingut en aquest circuit.
- 2) Què cal fer per modificar l'amplitud de v_O ?
- 3) Quina raó impedeix que el cicle de treball (DT) no pugui ser inferior a 0.5? Proposeu una alternativa per pal·liar aquest inconvenient

Nota: Busqueu informació a Internet. Hi ha moltes pàgines web relacionades amb aquest dispositiu, com per exemple:
<http://home.cogeco.ca/~rpaisley4/LM555.html>

CIRCUIT 2: Temporitzador

L2) En aquest muntatge, heu d'aconseguir que el circuit temporitzi el temps que us ha estat indicat a la **taula 2**.

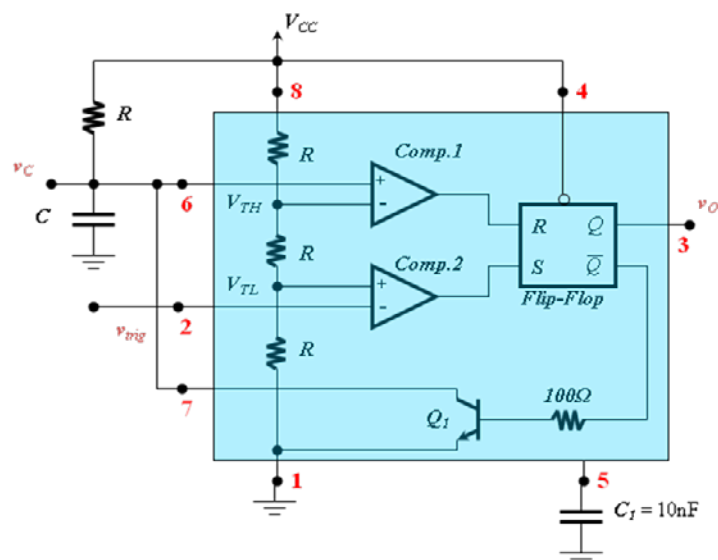


Figura 2.- Esquema elèctric del temporitzador amb 555

Estudiant	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
T (seg)	3	7	20	15	10	1	30	35	25	45

Taula 2.- Especificacions per a cada estudiant del segon circuit

- 1) Consulteu els apunts i, mitjançant càlculs determineu els valors de R i C que necessiteu per obtenir les especificacions de la taula 2.
- 2) Munteu el circuit i representeu els senyals $v_C(t)$ i $v_O(t)$.

Nota: Per realitzar el mecanisme de *Trigger*, utilitzeu una resistència connectada entre V_{CC} i el pin 2 del 555. Després utilitzeu un fil conductor connectat entre aquest pin i terra per generar l'activació del temporitzador.

- **Preguntes relacionades:**

- 1) Comenteu els punts més rellevants de les formes d'ona que heu obtingut en aquest circuit.
- 2) Quina és el valor màxim de tensió al que arriba el condensador, abans de descarregar-se completament?
- 3) Alteraria el funcionament del circuit si l'alimentació fos diferent a 10V? Justifiqueu la resposta

CIRCUIT 3: Oscil·lador sinusoidal

L3) En aquest muntatge, heu d'aconseguir que el senyal de sortida sigui sinusoidal i oscil·li a la freqüència i amplitud indicades a la **taula 3**.

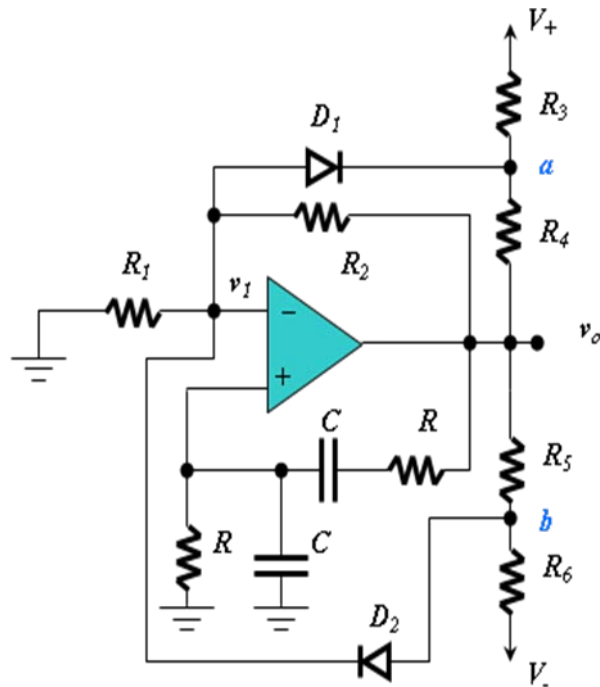


Figura 2.- Esquema elèctric del oscil·lador sinusoidal

Estudiant	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	E9	E10
V_{op}	2	10	13	2	12	1	5	8	4	3
f_o (KHz)	10	2	1	5	3	6	8	4	4	3

Taula 3.- Especificacions per a cada estudiant del tercer circuit

- 1) Consulteu els apunts i, mitjançant càlculs determineu els valors de R_{1-6} , R , C i V_{CC} per obtenir les especificacions de la taula 3.
- 2) Munteu el circuit i representeu els senyals $v_I(t)$ i $v_O(t)$.
- 3) Mitjançant l'opció FFT de l'oscil·loscopi, mesureu la distorsió harmònica del senyal de sortida (THD)

• **Preguntes relacionades:**

- 1) Comenteu els punts més rellevants de les formes d'ona que heu obtingut en aquest circuit.
- 2) Quina relació hi ha entre la magnitud de les dues senyals? Justifiqueu la resposta teòricament.
- 3) Per quina raó és pràcticament impossible implementar un mecanisme que permeti variar la freqüència d'oscil·lació i l'amplitud de sortida?

Annexe:

Referència	Estudiant
E1	Akkas Altan
E2	Ahroub Arbib Abdelaziz
E3	Cárdenas Vaquero, Carlos
E4	Castaño García, Ana
E5	Grau Feliu Jorge
E6	Molina Torres, Juan José
E7	Pérez Gómez , Ignacio
E8	Ribas Marí, Vicent
E9	Sánchez Rodríguez, Oscar
E10	Sanchez Sanchez, Jordi

Activitats pràctiques de LCIR – Mòdul 3

Circuits Analògics no lineals

Pràctica 6.- Aplicacions amb amplificadors operacionals de transconductància OTA LM13700

Introducció.

Aquesta pràctica consisteix en l'estudi i realització d'una sèrie de circuits basats en els amplificadors operacionals de transconductància variable (OTA). Aquest dispositiu presenta una entrada diferencial pel senyal d'entrada i una sortida en forma de corrent (a diferència dels AO convencionals que disposen d'una sortida per tensió), de manera que l'equació (1) defineix la relació entrada-sortida.

$$i_o = g_m \cdot v_d \quad (1)$$

El paràmetre g_m és el guany de transconductància de l'OTA i la seva unitat de mesura és el S (A/V o Ω^{-1}). La característica que converteix l'OTA en un dispositiu molt útil és la capacitat de poder variar aquest paràmetre mitjançant un corrent auxiliar I_{ABC} que anomenarem corrent de programació. En aquesta pràctica experimentarem amb els xips comercials LM13600 i LM13700 i muntarem diferents circuits en els quals veurem l'aplicació dels conceptes teòrics que desenvolupem tot seguit.

- **Símbologia del dispositiu i model equivalent**

El símbol que utilitzarem per aquest component és el de la Fig. 1. S'observa que, a més dels terminals d'entrada diferencial, i la sortida per corrent, hi ha dibuixat el terminal I_{ABC} .

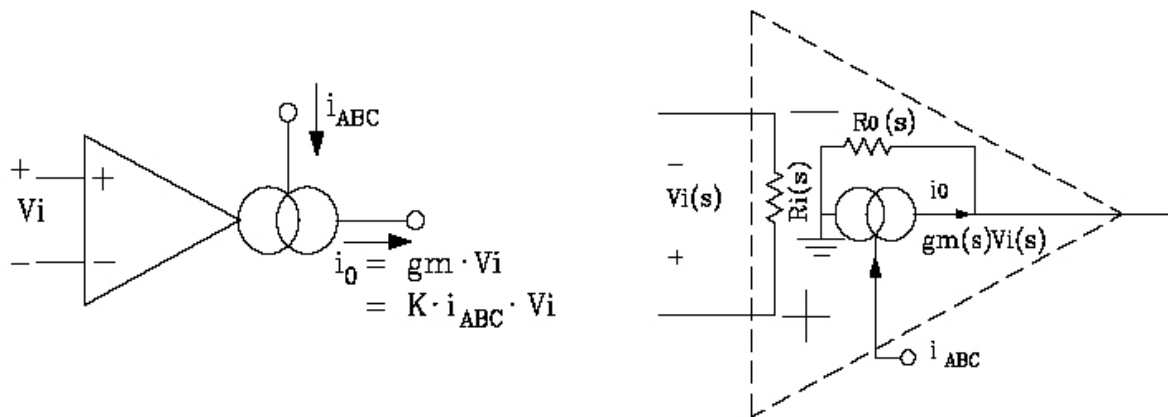


Figura 1.- Símbol i model de l'OTA

- **Estructura interna**

L'esquema intern d'un OTA comercial com el LM13600, o bé, el seu equivalent NE5517, està representat a la Fig 2. Aquest xip és dual i, per tant, disposarem de dos amplificadors totalment independents però amb les característiques quasi bé idèntiques. Per realitzar l'anàlisi i veure com mitjançant aquest circuit s'obté l'equació (1) estudiarem per separat cadascuna de les etapes.

- Q1 i Q2 formen un mirall de corrent que fixa el corrent de polarització del parell diferencial d'entrada.

- Q3 i Q4 constitueixen un amplificador diferencial bipolar amb característiques semblants a les dels AO. La resta de transistors estan constituïts com miralls de corrent. La seva funció serà la d'obtenir el corrent i_o proporcional a la diferència de corrents de col·lector $i_3 - i_4$.
- Q11 i Q12 formen un *buffer* Darlington seguidor d'emissor (col·lector comú), polaritzat a través de Q13, que servirà a augmentar el corrent i baixar la impedància de sortida.

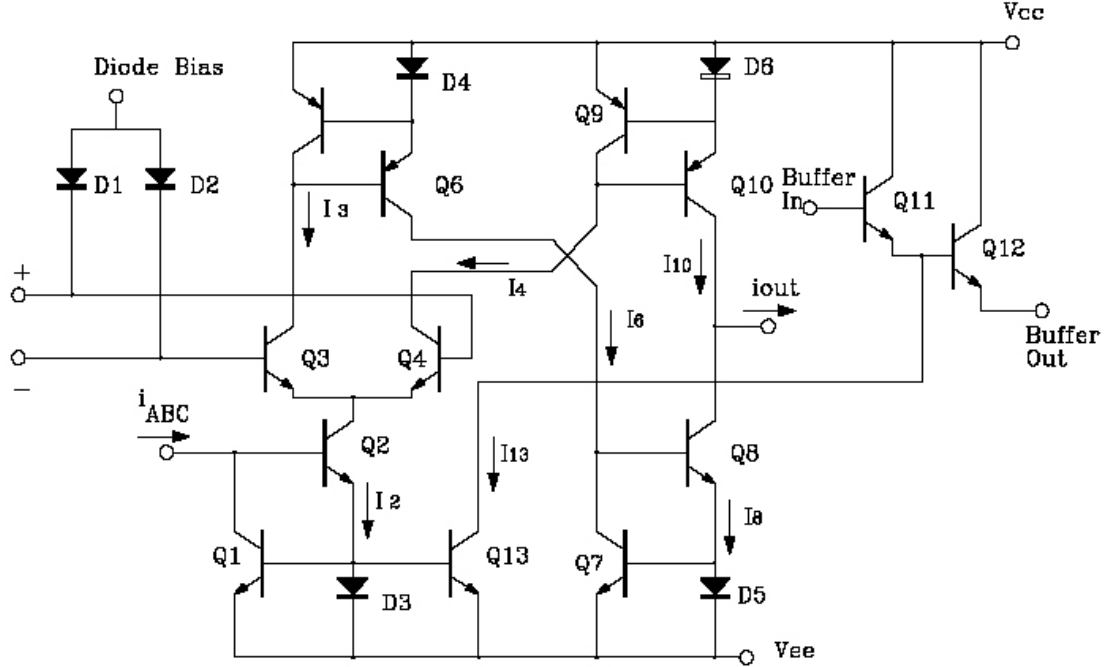


Figura 2.- Estructura interna de l'OTA LM13600 de Natiuonal Semiconductor

Mirall de corrent

Q1, Q2, Q13 i D3 tenen la funció de programar simultàniament tant el corrent d'emissor del diferencial com el corrent de polarització del *buffer* de sortida. Com que,

$$v_{BE1} = v_{BE2} \quad (2)$$

segons les equacions d'Ebers-Moll, aplicades al díode i al transistor

$$i_{D3} = I_{OS3} \cdot \exp\left(\frac{v_{AK3}}{V_T}\right) \quad i_{C1} = I_{O1} \cdot \exp\left(\frac{v_{BE1}}{V_T}\right) \quad (3)$$

s'obté

$$V_T = \ln\left(\frac{i_{D3}}{I_{OS3}}\right) = \ln\left(\frac{i_{C1}}{I_{O1}}\right) \quad (4)$$

expressió que es pot simplificar de la forma

$$i_{D3} = \left(\frac{i_{D3}}{I_{O1}}\right) \cdot i_{C1} \quad (5)$$

També es dedueix observant la Fig. 2 que els corrents de col·lector dels transistors Q1 i Q2 són

$$\begin{aligned} i_{C1} &= i_{ABC} - i_{B2} \\ i_{C2} &= i_{E2} - i_{B2} = i_{D3} + i_{B1} + i_{B3} - i_{B2} \end{aligned} \quad (6)$$

i substituint el corrent en el díode (5) a les expressions (6), s'obté l'equació

$$i_{C2} = \frac{I_{OS3}}{I_{O1}} I_{ABC} + i_{B1} + i_{B13} - \left(\frac{I_{OS3}}{I_{O1}} + 1 \right) i_{B2} \quad (7)$$

Aquesta expressió (7) la podem simplificar tal com mostra l'equació (8) si considerem que el corrent invers de saturació tan del transistor Q1 com el díode D3, d'un valor semblant, $I_{O1} \approx I_{OS3}$, resultant

$$i_{C2} = I_{ABC} - 2i_{B2} + i_{B1} + i_{B13} \quad (8)$$

Si els corrents de base són del mateix ordre de magnitud i, a més, els considerem menyspreables en front dels corrents de col·lector, resulta que aquest muntatge mirall obliga a tenir un corrent de col·lector I_{C2} igual a corrent de programació I_{ABC} . Així, queda tot clar que podem modificar el punt de treball del parell diferencial mitjançant l'aplicació d'un corrent exterior.

$$i_{C2} = I_{ABC} = i_{C13} \quad (9)$$

Parell diferencial

A l'amplificador diferencial de Q3 i Q4 es compleix l'equació d'entrada

$$v^+ = v_{BE4} - v_{BE3} + v^- \quad (10)$$

i, com que la tensió diferencial d'entrada és $v_d = v^+ - v^-$, ens queda expressada com una relació logarítmica entre els corrents de col·lector dels transistors

$$v_d = V_T \ln \left(\frac{i_4}{i_3} \right) \quad (11)$$

Si suposem que el quocient entre aquests és aproximadament la unitat, ja que són bastant semblants, es pot desenvolupar l'equació (11) en sèrie de Taylor al voltant de la unitat, i obtindrem

$$v_d = V_T \ln \left(\frac{i_4 - i_3}{i_3} \right) \quad (12)$$

El corrent d'emissor d'aquest diferencial és el corrent de col·lector de Q2 que s'ha calculat anteriorment a (9). Suposant menyspreables els corrents de polarització i_{b3} i i_{b4} resulta $i_{C2} = i_4 + i_3$, per tant, l'equació (12) esdevé

$$v_d = V_T \ln \left(\frac{i_4 - i_3}{I_{ABC}/2} \right) \quad (13)$$

A la sortida es té la diferència de corrents de col·lector dels transistors Q8 i Q10 gràcies als miralls de corrent,

$$i_6 = i_3 \quad i_{10} = i_4 \quad i_8 = i_6 \quad (14)$$

donant com a resultat un corrent de sortida

$$i_0 = i_{10} - i_8 = i_4 - i_3 \quad (15)$$

Finalment, doncs, l'equació (13) quedarà expressada com

$$i_o \approx \left(\frac{I_{ABC}}{2V_T} \right) \cdot v_d \quad (16)$$

Comparant les equacions (1) i (16), s'obté un valor del paràmetre de transconductància de

$$g_m = \frac{I_{ABC}}{2 \cdot V_T} = q \frac{1}{2KT} I_{ABC} \quad (17)$$

on s'observa la seva dependència amb la temperatura absoluta. Aproximadament, a 25°C, resulta una transconductància $gm = 19,23 \cdot I_{ABC}$ (S).

Diodes linealitzadors

Per voltatges diferencials superiors a pocs milivots (>25mV), l'equació (12) obtinguda quan aproximem (11), ja no és tan vàlida, i d'això en resulta un paràmetre gm no gaire lineal. Per aquest motiu, hi ha disposats els díodes D1 i D2, a l'etapa d'entrada. La funció que tenen és la de linealitzar la funció de transferència de l'amplificador. Encara que també es provoca una disminució del paràmetre de transconductància.

Si se suposa que D1 i D2 són polaritzats en directa a través d'una font de corrent I_D i el senyal d'entrada s'aplica en forma d'un corrent i_s tal com es veu a la Fig. 3, es pot plantejar una equació nova on intervenen les tensions ànode-càtode dels díodes i les tensions base emissor dels transistors d'entrada

$$v_{AK2} + v_{BE3} - v_{BE4} - v_{AK1} = 0 \quad (18)$$

També

$$i_4 = \frac{I_{ABC} + i_0}{2} \quad i_3 = \frac{I_{ABC} - i_0}{2} \quad i_{D1} = \frac{I_D}{2} - i_s \quad i_{D2} = \frac{I_D}{2} + i_s \quad (19)$$

Les expressions (19) són vàlides sempre que els díodes siguin polaritzats en directa, o sigui, sempre que el corrent de polarització de cada díode superi el corrent de senyals

$$|i_s| \leq \frac{I_D}{2} \quad (20)$$

A partir de les expressions (18) i (19), es dedueix el corrent de sortida de l'OTA. Es tracta de l'equació que cal utilitzar sempre que es configura l'OTA amb díodes linealitzadors

$$i_o \approx \left(\frac{2 \cdot I_{ABC}}{I_D} \right) \cdot i_s \quad (21)$$

A la pràctica, el senyal d'entrada és una tensió referida a massa v_{in} tal com mostra la Fig. 4. Els díodes es polaritzen també a través d'una resistència R_D . La resistència R_p és un potenciòmetre de 1kΩ per balancejar l'etapa d'entrada diferencial de l'OTA.

Observant la Fig. 5 i a partir del model en petit senyal dels díodes, deduïm el valor del corrent de senyal que s'amplificarà

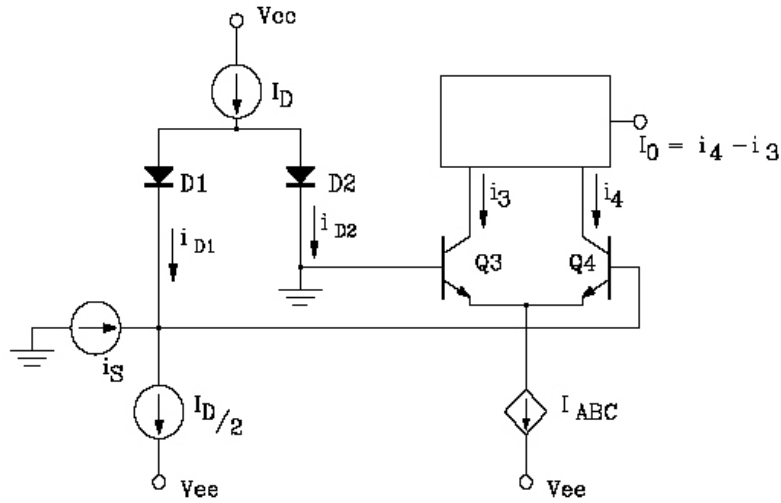


Figura 3.- Polarització idela dels díodes linealitzadors

$$i_s \approx \left(\frac{R_{in} // \left(\frac{R_p}{2} \right)}{2 \cdot r_d + 2 \cdot \left(R_{in} // \left(\frac{R_p}{2} \right) \right)} \right) \cdot \frac{v_{in}}{R_{in}} \quad (22)$$

on r_d és la resistència dinàmica dels díodes en senyal donada per

$$r_d \approx \left. \frac{\partial v_{AK}}{\partial I_D} \right|_Q \approx \frac{V_T}{I_{DQ}} = \frac{2V_T}{I_D} \quad (23)$$

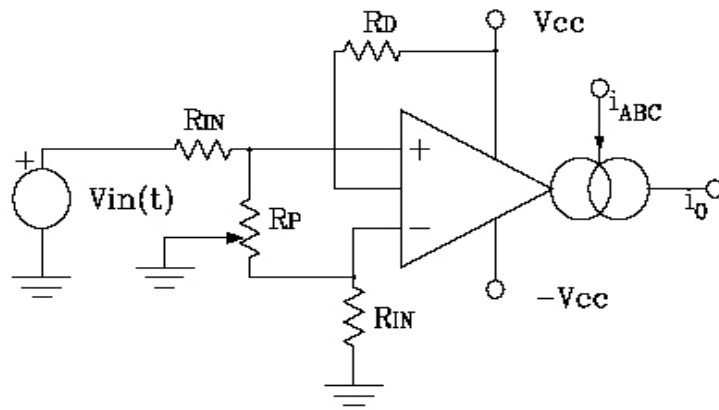


Figura 4.- Circuit típic d'aplicació amb díodes linealitzadors. Fixem-nos-hi com s'aplica un senyal d'entrada de tensió V_{in} referit a masa

Per una tensió $V_T = 26\text{mV}$ i un corrent $I_D = 1\text{mA}$, obtenim $r_d = 50\Omega$.

En general es complirà que $R_{in} // (R_p/2) \gg r_d$, per tant l'expressió (22) queda simplificada segons (24). El valor del paràmetre de transconductància amb els díodes linealitzadors (g_{m_I}) es pot deduir a partir de (24) i correspondrà a l'indicat a l'equació (25)

$$i_s \approx v_{in} / 2R_{in} \quad (24)$$

$$i_o = \frac{I_{ABC}}{I_D R_{in}} v_{in} = g_{m1} \cdot v_{in} \quad (25)$$

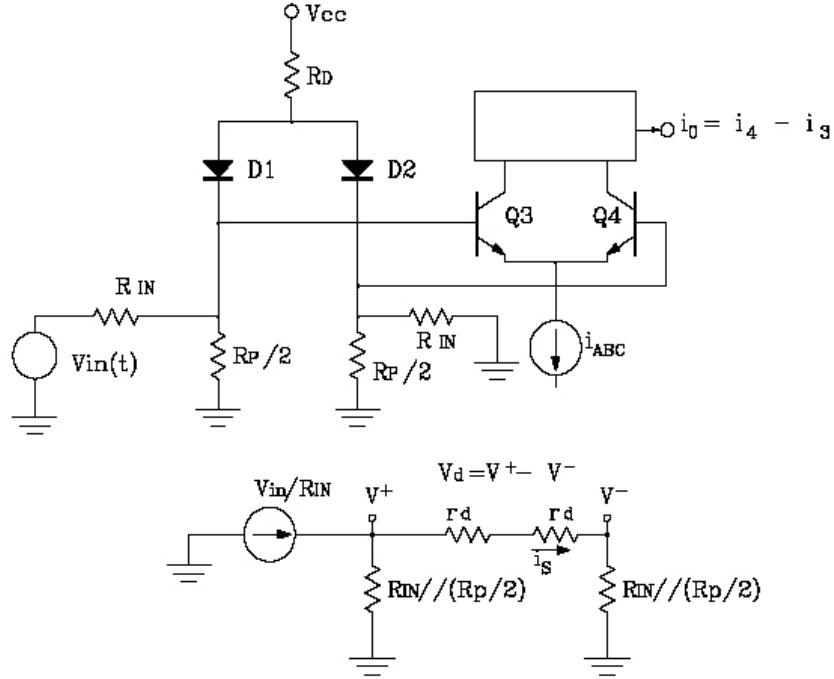


Figura 5.- Circuit equivalent en petit senyal

Si es calcula la tensió diferencial d'entrada a l'OTA, podem verificar la validesa del paràmetre g_{m1} des d'un altre punt de vista.

$$v_d + v^+ - v^- = 2 \cdot i_s r_d = \frac{v_{in}}{R_{in}} r_d \quad (26)$$

$$i_o = g_m \cdot v_d = \frac{I_{ABC}}{2V_T} \left(\frac{v_{in} \cdot V_T}{R_{in} \cdot I_{DQ}} \right) = g_{m1} \cdot v_{in} \quad (27)$$

El valor típic del corrent I_D serà prou gran per complir la desigualtat (20) en tot el marge dinàmic del senyal. Generalment prenem $I_D = 1\text{mA}$ ($I_{DQ} = I_D / 2$). Aquest corrent ve donat per l'expressió (28). Per $V_{CC} = 15\text{V}$ resulta una $R_D = 14\text{k}\Omega$.

$$i_D = \frac{V_{CC} - V_{AK}}{R_D + ((2R_p) // R_{in}) / 2} \quad (28)$$

El valor de R_{in} , s'estableix en funció del marge dinàmic de la tensió d'entrada V_{in} . Sempre s'haurà de complir la desigualtat (20), o sigui,

$$\left| \frac{v_{inMAX}}{2R_{in}} \right| = i_{sMAX} \leq \frac{I_D}{2} = 0.5\text{mA} \quad (29)$$

Buffer de sortida

Aquest *buffer* amplificador en col·lector comú, està constituït pels transistors Q11 i Q12. El corrent de polarització de Q11 és el corrent I_{ABC} , el corrent de polarització de Q11 és mínim i això proporciona una impedància d'entrada gran. Per valors grans d' I_{ABC} , Q13 polaritza Q11 amb més corrent i en resulta un *Slew-Rate* més elevat. En senyal es pot demostrar que l'equivalent lineal és el representat a la Fig. 6. Es pot demostrar que el guany de corrent és:

$$A_i = \frac{i_L}{i_o} = \frac{(h_{fe} + 1)^2 R_o R_e}{(R_o + h_{ie}(h_{fe} + 2) + (R_L // R_e)(h_{fe} + 1)^2)(R_L + R_e)} \quad (30)$$

suposant els paràmetres dels transistors idèntics. L'expressió (30) s'aproxima sense gaire error per

$$A_i = \frac{i_L}{i_o} = \frac{R_o}{R_L} \quad (31)$$

El guany en tensió del *buffer* és aproximadament la unitat

$$A_v = \frac{v_{oL}}{v_o} = \frac{(h_{fe} + 1)^2 \cdot R_L}{h_{ie}(h_{fe} + 2) + R_L(h_{fe} + 1)^2} \quad (32)$$

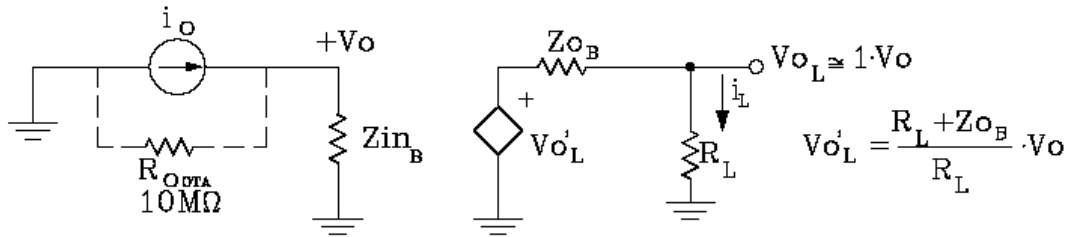


Figura 6.- Model lineal del col·lector comú excitat amb el senyal de sortida de l'amplificador OTA

La impedància d'entrada és

$$Z_{inB} = \frac{v_o}{i_o} = R_o // [h_{ie}(h_{fe} + 2) + (R_L // R_e)(h_{fe} + 1)^2] \quad (33)$$

La impedància de sortida es pot aproximar per

$$Z_{oB} = \frac{v_{oL}}{-i_L} = \frac{h_{ie12}}{h_{fe12} + 1} \quad (34)$$

que és un valor molt petit. D'aquesta forma el col·lector comú es converteix en una font pràcticament ideal de tensió.

- **Connexionat**

A partir del manual de fabricant sabem que els dos OTA disposen del connexionat mostrat a la Fig. 7. L'alimentació positiva V_{cc} s'aplica al pin 11 i l'alimentació negativa V_{ee} s'aplica al pin 6

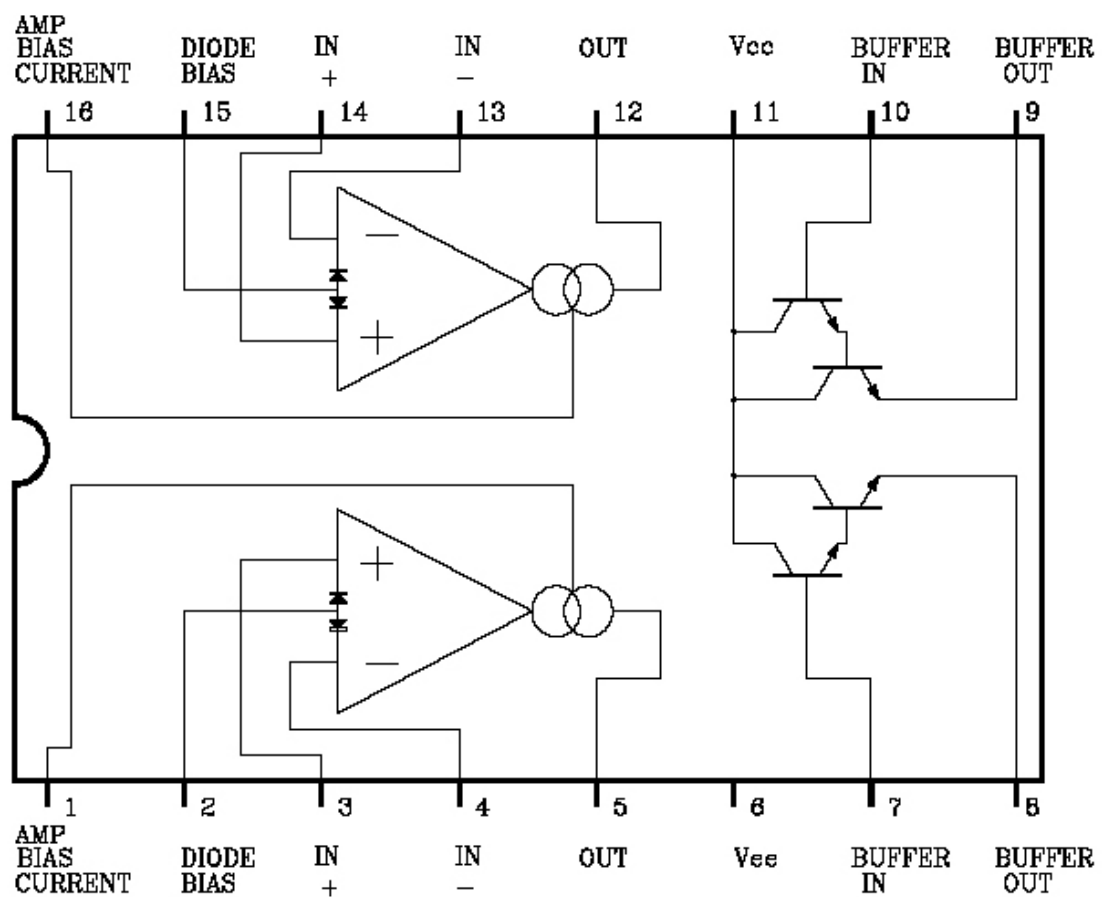


Figura 7.- Connexionat del LM13600/700 de National Semiconductor.

Realització pràctica (Treball lectiu)

L'aplicació analògica no lineal que realitzareu al laboratori es tracta de la **multiplicació de quatre quadrants**. Aquesta funció (figura 1) té una importància molt important en el desenvolupament d'equips electrònics tant industrials (mesura del valor eficaç real d'un senyal analògic, potència rms de la xarxa elèctrica, etc) com de comunicacions (moduladors i demoduladors, control automàtic de guany, etc). Els senyals $v_{G1}(t)$ i $v_{G2}(t)$ són bipolars en un marge dinàmic de $\pm 10V$ i fins a una freqüència de 1MHz. La seva implementació electrònica es realitza mitjançant el dispositiu OTA LM13600 tal i com mostra la figura 2.

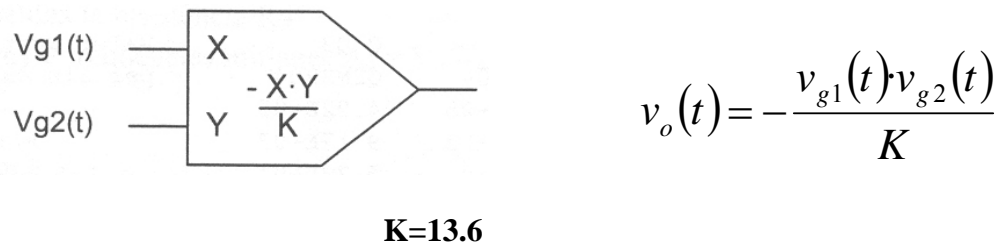


Figura 1.- Símbol del multiplicador analògic

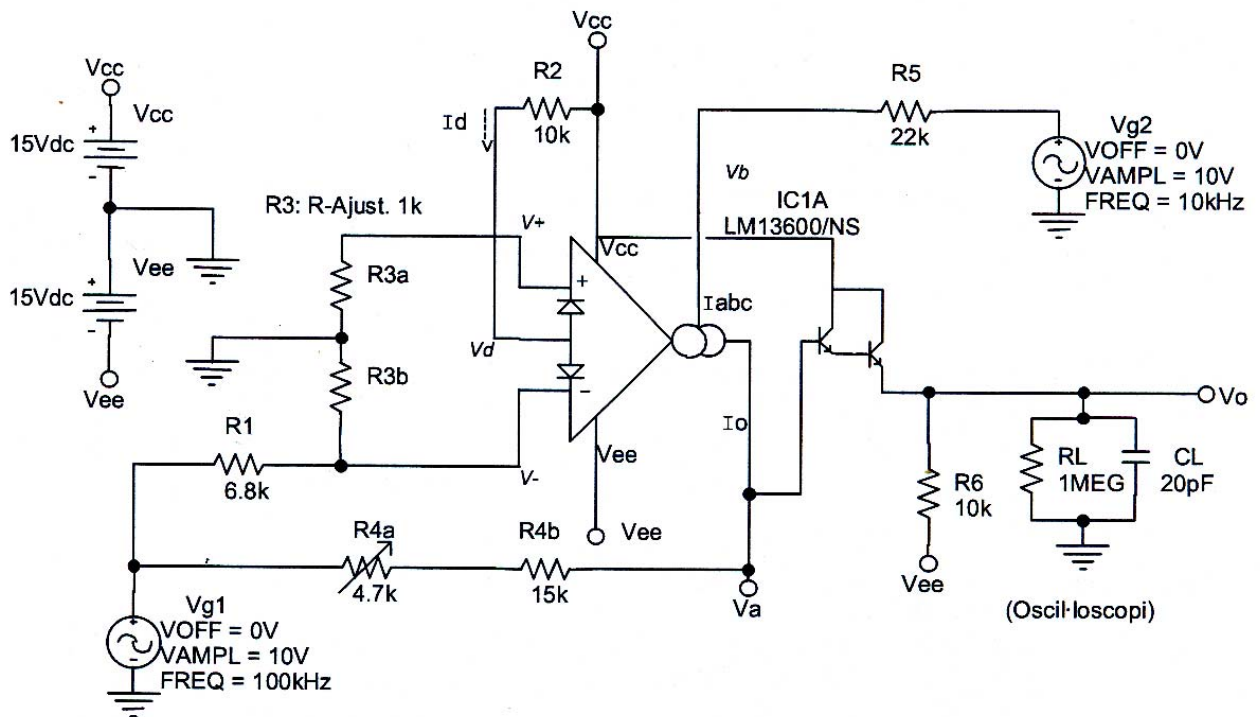


Figura 2.- Esquema elèctric del multiplicador de quatre quadrants proposat

Realitzeu els següents apartats, després d'haver muntat el circuit en horari no lectiu.

- Després d'haver muntat el circuit de la figura 2 fora de l'horari lectiu, Munteu el circuit de la figura 2. La resistència R_3 és un potenciòmetre de $1K\Omega$ amb el cursor a massa i utilitzeu un potenciòmetre de $10K\Omega$ per implementar R_4 . Amb $v_{g1} = v_{g2} = 0V^1$, mesureu amb el multímetre les tensions en DC als següents punts: V_A , V_B , V_D , V^+ , V^- i els corrents I_D , I_{ABC} .

¹No connecteu v_{g1} directament a massa. En comptes d'això, disminui la tensió del generador al mínim valor possible. Pel que respecta a v_{g2} sí que el podeu connectar a massa)

- 2) **Minimització de l'error de sortida (V_{os}).** L'expressió (1) indica que per tal d'obtenir la sortida ideal de la figura 1, es necessari realitzar certs ajustaments en el circuit (Concretament, minimitzar la tensió d'offset de sortida del amplificador operacional V_{OS} com el guany K_I). Per tant, amb $v_{g1} = v_{g2} = 0$, ajusteu R_3 fins aconseguir $V_A = 0$ (la mínima possible). Quan val V_O després de realitzar aquest procés?
- 3) **Minimització de l'error de sortida (K_I).** Connecteu el canal 1 de l'oscil·loscopi al generador de funcions de l'entrada v_{GI} . Amb $v_{g1}(t) = 10V \cdot \sin(2\pi \cdot 10KHz \cdot t)$ i $v_{g2} = 0V$. Ajusteu R_{4a} fins aconseguir $V_A = 0$ (la mínima possible). Representeu gràficament aquesta variable.
- 4) Amb $v_{g1}(t) = v_{g2}(t) = 10V \cdot \sin(2\pi \cdot 10KHz \cdot t)$, mesureu amb el canal 2 de l'oscil·loscopi les sortides $v_A(t)$ i $v_O(t)$. Utilitzeu el mode XY per representar $v_A = f(v_{g1})$.
- 5) Amb l'ajuda d'un altre generador de funcions² ajusteu $v_{g1}(t) = 10V \cdot \sin(2\pi \cdot 100KHz \cdot t)$ i $v_{g2}(t) = 10V \cdot \sin(2\pi \cdot 1KHz \cdot t)$ i representeu la tensió de sortida. Comenteu els resultats obtinguts.

Sample & Hold

Els circuits de mostreig i retenció (S/H, de vegades anomenats 'Follow & Hold') és un dels circuits més importants que existeixen en l'àmbit d'Enginyeria Electrònica, els quals, formen part de les aplicacions de processament de senyals en l'adquisició de dades mitjançant sistemes de conversió A/D. Precisament, El sample & hold és un dels passos previs en el procés d'aquesta conversió A/D (Fig. 3). Aquest procés consisteix en un *mostrejador* (sample) que captura el valor de l'entrada cada cert instant de temps periòdic $t = T, 2T, 3T, \dots$, on $T = 1/F_s$ (Fig. 4); un quantificador que fa de '*retenidor*' (hold) d'aquest senyal per a cada instant de temps T (Fig 5); i un codificador que assigna un valor binari (ceros i uns) del valor que hi ha retengut per a cada instant de temps

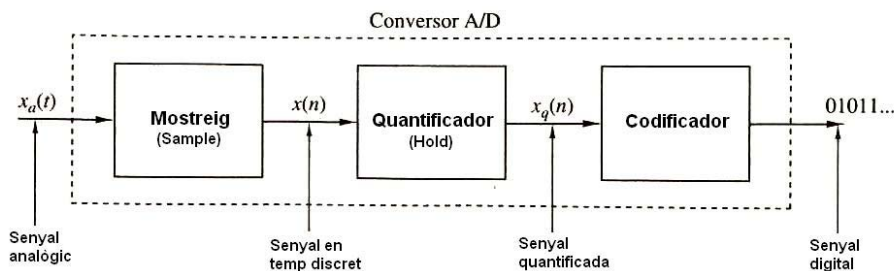


Figura 3.- Conversió A/D

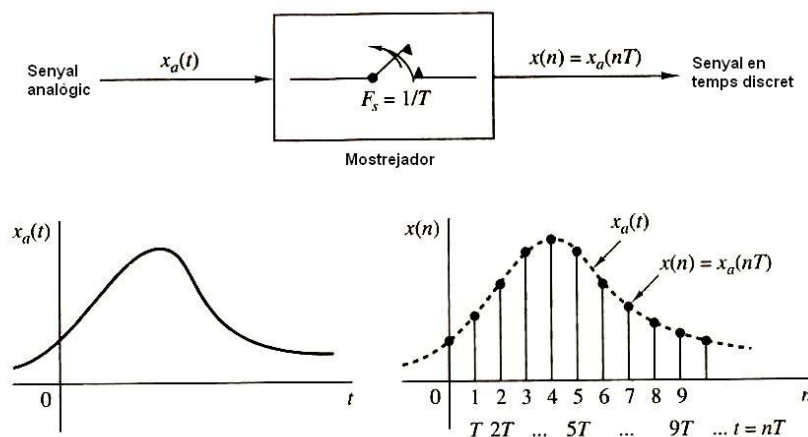


Figura 4.- Funcionament del mostreig

² Demaneu-li al professor quan arribeu a aquest punt.

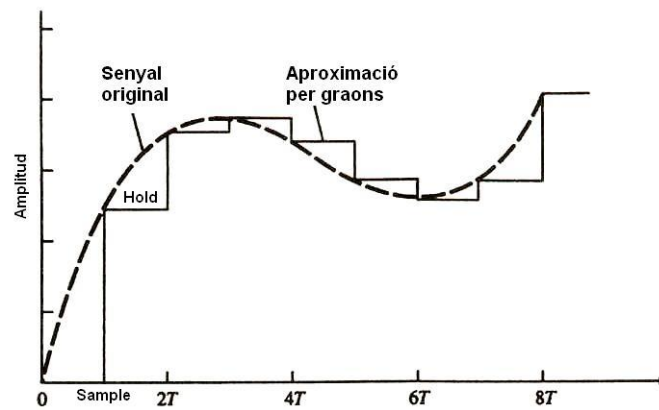


Figura 5.- Sortida del retenidor (Hold)

La Fig. 3 mostra un circuit que implementa la funció 'follow & hold' i que també utilitza un amplificador OTA. A diferència de les configuracions que hem vist fins ara l'amplificador operacional està alimentat amb una tensió simètrica de $\pm 5V$ i utilitza com a senyal de control V_C una tensió pulsant del mateix valor.

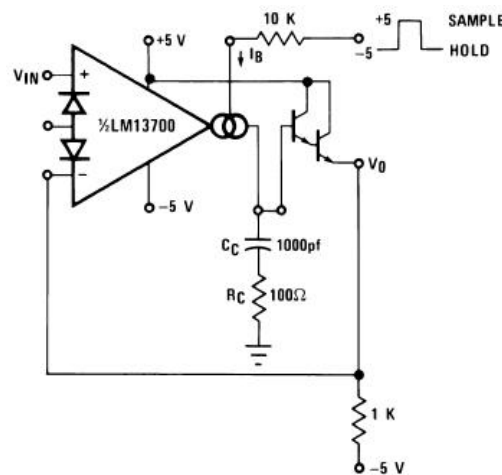


Figura 6.- Esquema elèctric del 'Sample & Hold'

El funcionament d'aquest circuit és el següent:

Quan $V_C = 5V$ (**Sample**), l'OTA treballa de la seva manera habitual, és a dir, $gm = K \cdot I_{ABC}$ $I_{O(OTA)} = gm \cdot V_d$. D'aquesta manera el condensador C_C es carrega i el valor d'entrada V_{IN} queda enmagatzemat en el condensador i, com que el guany del *buffer* és unitari, $V_O(t) = V_{IN}(t)$.

Quan $V_C = -5V$ (**Hold**), l'OTA deixa de funcionar correctament, el circuit queda enllaç obert, i l'últim valor d'entrada (que hi havia just abans de fer-se el canvi) queda retingut al condensador C_C .

A la vista de tot això, munteu el circuit de la figura 12 i feu les mesures, tot contestant les preguntes que us demanen

- Demostreu que quan $V_C = 5V$ el guany a la banda de pas de l'OTA és unitari i que, per tant, $V_O(t) = V_{IN}(t)$.
- Connecteu un senyal d'entrada $V_{IN}(t) = 2.5 \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot 500Hz \cdot t)$ i un senyal V_C de $\pm 5V$ i forma d'ona quadrada de $f = 5KHz$ ³. Quin és el període de mostreig T ?
- Connecteu el circuit, amb tots dos senyals, i la font d'alimentació. Dibuixeu el senyal de sortida $V_O(t)$ i el senyal $V_C(t)$ ⁴.

³ Per fer això necessiteu dos generadors de funcions. Demana al professor un altre generador de funcions.

- d)** Quin és el mínim temps de mostreig T que es pot configurar? Quin és el la freqüència de mostreig F_s mínima que verifica que el període del senyal de sortida és el mateix que de V_{IN} ?

⁴ Utilitzeu l'opció Run/Stop de l'oscil·loscop per congelar el senyals i veure la relació temporal que hi ha entre totes dues senyals